汉字识别中亚词汇语音和语义信息在N170上的神经适应*

张瑞　王振华　王小娟　杨剑峰

（陕西师范大学心理学院，西安，710062）

摘　要 视觉词汇识别的事件相关电位(ERP)研究发现早期的脑电成分 N170 具有对词汇的敏感性，可能反映了字形、语音和语义加工，目前还没有得到统一的结论。本研究利用汉字形声字声旁表音和形旁表义的独特性，使用神经适应范式深入考察了 N170 对汉字亚词汇语音和语义信息的敏感性。实验 1 操纵了连续汉字的声旁和整字读音重复呈现探究其诱发的神经适应性，结果发现了左侧电极的 N170 对声旁和整字读音重复都产生了神经适应。实验 2 进一步操纵形旁和整字语义的重复呈现，结果发现左侧 N170 仅对整字语义相似性具有神经适应性，而右侧 N170 对形旁和整字语义重复都产生了神经适应。实验结果表明，左侧 N170 不仅对整字语音和语义信息敏感，还对亚词汇的声旁信息敏感；而右侧 N170 对整字语义以及亚词汇的形旁信息敏感。

关键词 词汇阅读，N170，汉字，神经适应

1 引言

大脑左侧梭状回中部在词汇阅读中激活是语言认知神经科学的一个重要发现，该脑区被认为是负责视觉词形加工的区域(Visual Word Form Area, VWFA)(Cohen et al., 2000)。有研究发现其不仅对自下而上的字形特异性加工以及书写加工敏感，还对自上而下的语音和语义加工敏感(Devlin et al., 2006; Mechelli et al., 2006; Price & Devlin, 2011)。

在视觉词汇识别的事件相关电位(Event Related Potential, ERP)研究中，研究者发现早期的脑电成分 N170 对视觉词汇具有敏感性(Maurer et al., 2005; Maurer & McCandliss, 2007)。N170 在视觉词汇识别中不仅对字形敏感(Rossion et al., 2003; Lu et al., 2011)，还有研究发现它受到语音加工(Sacchi & Laszlo, 2016; Shaywitz et al., 2002)和语义加工(Segalowitz & Zheng, 2009; Scott et al., 2009)的调节，但是，它是否反映了词汇识别中的字形–语音/语义的对应加工还缺乏深入研究。而且，有研究表明在词汇识别中 N170 与颞枕区域的神经活动相关，尤其是左侧梭状回被认为是视觉词形识别区(Visual Word Form Area, VWFA)，然而，VWFA 在提出之初就受到了来自多方面研究的挑战，对其在词汇阅读中的功能还没有得到统一的认

收稿日期: 2020-8-7

*国家自然科学基金(31671167)，中央高校基本科研业务费专项资金（GK202101010，2017TS052）。

通讯作者: 王小娟，wangxj@snnu.edu.cn；杨剑峰，yangjf@snnu.edu.cn

识(详见综述，王小娟 等，2010)。该脑区在词汇阅读中是否对应着词形−语音/词形−语义的映射加工同样是当前研究争论的问题。本研究利用汉字形声字声旁表音和形旁表义的独特性，通过记录适应范式下N170对连续呈现汉字间的重复信息诱发的适应性反应，考察N170对词汇和亚词汇水平下的语音/语义信息的敏感性，从而探讨N170在汉字阅读中的作用。

1.1 N170受到语音加工的调节

N170最先被认为与视觉词汇识别中的词形加工相关。主要的证据是因为词汇相对于符号、形状会诱发更大的N170脑电反应(Maurer et al., 2005)。而且，对比笔画组合与假词诱发的N170反应，虽然二者都具有与词汇相似的视觉特征，但假词诱发的N170反应更大(Eulitz et al., 2000)，反映了N170脑电成分可能与词汇的字形加工相关(Rossion et al., 2003)。从而，研究者认为左侧化的N170可能是字形加工的脑电指标，反应了被试对字形加工的认知过程(Lu et al., 2011)。

进一步研究发现左侧 N170 反应受到了词汇语音加工的调节。例如，Sacchi 和 Laszlo (2016)发现被试对词汇图片的反应比对客体图片的反应更加左侧化，而且个体的语音意识可以预测N170成分的左侧化程度。来自脑功能成像(fMRI)的研究也发现，与N170成分具有高度相关的左侧梭状回的激活会随着字母组合频率的增加而呈现梯度增强，字母组合频率的高低意味着词汇可读性的强弱，该结果一方面说明VWFA可能不仅是对词汇的字形加工敏感，还受到了词汇可读性的影响；另一方面，可能还反映了VWFA对视觉词汇的形−音转换加工敏感(Binder et al., 2006; Vinckier et al., 2007)。

更多的研究证据表明，N170可能反映着词形−语音的转换加工。在拼音文字系统中，词形与语音之间具有系统的对应关系，N170 对词形的敏感可能意味着对词形−语音的转换加工敏感。这种词形−语音的转换加工技能被称为形−音解码能力，Shaywitz等人(2002)的脑成像研究发现，VWFA 的激活强度与儿童的形−音解码能力具有高度的相关。左侧化的 N170可能就反映了VWFA对字形到语音表征的自动连接(Proverbio & Zani, 2003)。有研究者据此提出了语音对应假设，认为有更好语音意识的个体在视觉词形加工中会展现出比语音意识差的个体更加左侧化的现象(Maurer & McCandliss, 2007)。来自语言训练的研究为语音对应假设提供了证据。例如，Temple等人(2003)对阅读障碍儿童进行形−音匹配训练，发现梭状回中部表现出训练前没有的正激活。在对正常阅读者进行语音训练后，VWFA 受到了语音学习(Xue et al., 2006)和形−音对应的透明程度(Mei et al., 2013)的调节。而在Fraga González

等人(2016)对阅读障碍被试的形−音匹配训练中，同样发现形−音训练前后 N170 波幅存在差异。从而表明 N170 反应受到字形−语音加工的影响。

1.2 N170 受到了语义加工的调节作用

还有研究发现，N170 的反应受到了语义加工的调节。如 Hauk 等人(2006)采用回归分析发现，真词诱发的 N170 与词汇的词根家族的语义一致性具有显著的相关，即同词根词汇的语义越一致，该词汇所诱发的 N170 反应越大。语义加工对 N170 的调节作用也得到了一些支持性证据，一方面的证据来自于任务对比的研究。如 Segalowitz 和 Zheng (2009)对比了两种典型的词汇加工任务，发现 N170 受到了加工任务的调节，语义判断比词汇判断任务在真词条件下诱发了更大的 N170 反应。另一方面的证据是直接操纵词汇语义属性的研究。如 Scott 等人(2009)发现低频条件下中性词汇的 N170 大于积极和消极词汇，而在高频条件下，消极词汇的 N170 大于中性和积极词汇，表现出词汇的情绪语义对 N170 的调节作用。

N170 受语义加工的调节的发现与 VWFA 的脑功能成像结果一致。有研究发现 VWFA 在结构及功能上与高水平的语言脑区相连(Saygin et al., 2016)，从而被认为在词形−语义的对应加工中起作用(Dehaene & Cohen, 2011; Price & Devlin, 2011)。也有研究表明，语义加工能够调节 VWFA 脑区的激活强度。比如，词汇的语义相关性会调节梭状回（VWFA）的激活(Mechelli et al., 2006)。语义对 VWFA 的调节作用还得到了 Devlin 等人(2006)重复启动效应的结果支持。Devlin 等人(2006)发现假词在 VWFA 没有任何启动效应，而真词重复使该区域的激活显著下降，真词和假词的差异主要在于词典信息上，表明 VWFA 的重复启动受到了高水平的词典信息(如语义加工)的影响。进一步的实验也发现启动词与目标词在语义相关时 VWFA 的激活明显弱于语义不相关时的激活，具有显著的语义启动效应(Gold et al., 2006)。上述的间接证据都表明 VWFA 可能对应着词形−语义的加工。

1.3 汉字识别的 N170 研究

在汉字识别研究中，也发现了相对早期的 N170 成分对词汇的敏感性反应。N170 成分主要在颞枕区域的 ERP 电极上表现出对词汇(相对于面孔、线条图)具有更大的反应(Zhao, et al., 2012)。Cao 等人(2015)使用神经适应的范式发现，汉字重复条件要比房屋重复和控制条件产生更大的 N170 的神经适应。这一结果与汉字阅读的 fMRI 研究相一致，即左侧梭状回具有对字形加工的敏感性激活(Liu, et al., 2008; Wang et al., 2011)。

虽然有研究发现了汉字识别中 N170 以及左侧梭状回的参与激活，但是 N170 或是左侧

梭状回在汉字阅读中的功能还缺乏深入的认识。有研究表明，汉字所诱发的 N170 反应可能同样与语音加工相关。如 Yum 等人(2014)操纵汉字的规则性和一致性，要求被试进行词汇判断任务和延迟命名任务，结果发现了 N170 上的规则性效应，即与不规则词相比，规则词诱发更大的 N170 波幅。这一结果与 Lee 等人(2007)发现的汉字阅读的声旁家族读音一致性效应一致，即被试在阅读汉字时，低一致词要比高一致词诱发更大的 N170 波幅。汉字加工诱发的 N170 反应上发现的规则性和一致性效应都反映了 N170 可能与语音加工相关。然而，也有少数研究发现 N170 可能与语音加工并不相关，如 Lin 等人(2011)对比了真字和不能发音伪字的脑电反应，发现二者所诱发的 N170 反应并无差异，从而认为汉字阅读的 N170 反应仅对正字法加工敏感，而对语音加工不敏感。

与拼音文字相比，汉字同时具有字形−语音(声旁表音)和字形−语义(形旁表义)对应的独特性，从而使用汉字阅读探讨 N170 或 VWFA 在阅读中的功能具有明显的优势，尤其是探讨字形−语义加工中的作用。但是，目前还没有研究直接操纵汉字的表义属性对此问题进行探讨。目前，只有个别研究探讨了语义加工对 N170 反应的影响，如 Hsiao 等人(2007)对比不同结构类型的形声字，即左形右声字(SP, 如“採”)和左声右形字 (PS, 如“彩”)。结果发现形声字的结构类型对 N170 存在影响，左形右声的形声字诱发的左侧 N170 波幅要大于左声右形的形声字，而右侧的 N170 反应则完全相反。从而表明 N170 反应不仅受到了语音加工的影响，也受到了形旁语义的加工影响。

汉字识别区别于拼音文字的另一特点是可能涉及了更加复杂的视觉/空间加工，从而在 N170 上表现出双侧化的激活。在拼音文字研究中，词汇诱发的 N170 比较一致地表现出左侧化趋势(Rossion et al., 2003; Maurer & McCandliss, 2007)，而汉字识别中发现的 N170 更多表现为双侧化的反应(Hsiao et al., 2007; Lee et al., 2007)。跨语言的 ERP 研究发现，韩语和英语词汇阅读引起了明显的左侧化 N170 反应，而汉字和图片则诱发了双侧的 N170 反应(Kim et al., 2004)。词汇阅读的 fMRI 研究也得到了相似的结果，如 Tan 等人(2001)比较汉字和英语词汇阅读发现，相对于英语阅读，汉字阅读中右侧梭状回区域更多地参与了激活。右侧 N170 或梭状回在汉字识别中的作用被解释为负责了复杂的视觉特征分析，但是，它能否反映更多的语音/语义加工还缺少深入研究。

1.4 本研究的问题

综上，N170 反映的认知加工以及梭状回在词汇阅读中的作用目前仍然没有得到一致的

结论，拼音文字的研究发现 N170 不仅反映了词形加工，还受到了阅读中的语音和语义加工的调节。汉字虽然具有独特的表音和表义特点，但是还没有研究直接操纵汉字的表义属性来探讨阅读中 N170 反应的认知加工。本研究通过适应范式，系统地操纵汉字声旁和形旁所诱发的神经适应，来深入探讨 N170 在汉字早期识别中所反映的认知加工。

适应范式是通过操纵连续呈现刺激材料间的相似性，来诱发特定的加工或神经活动的适应性下降。该范式假定大脑神经元在面临两个相同刺激重复出现时，会表现出神经反应的适应性激活下降(Krekelberg et al., 2006)，这种神经适应性反应能真实地反映出激活变化所对应的认知成分，比较典型的有 Odd-ball 实验范式和快速适应技术(Rapid Adaptation Technique)。适应范式已经在视觉(Glezer et al., 2009)以及语音研究(Glezer et al., 2016) 中得到了应用，能很好地用来研究刺激特性的大脑表征机制。

结合汉字独特地表音和表义特性，适应范式为探讨 N170 在汉字识别中的作用提供了可能。汉字识别是一个快速过程，形旁、声旁的亚词汇语音/语义信息会被同时自动激活并相互影响地参与汉字加工(周晓林 等, 2000; Zhou et al., 2012; Zhou & Marslen-Wilson, 1999)，因此，很难将某个部件如声旁的字形、语音和字形−语音加工分离开进行细致地考察。通过适应范式，可以操纵连续呈现汉字共享的部件信息，考察部件在汉字阅读中诱发的神经反应。例如，对比共享声旁整字读音相同、共享声旁整字读音不同两个条件，就可以考察声旁诱发的 N170 适应效应。本研究具体通过两个 ERP 实验，考察 N170 在声旁(实验 1)和形旁(实验 2)所传递的词汇和亚词汇水平的语音/语义信息上的适应性。实验一探讨连续呈现汉字的声旁和整字读音重复诱发的神经适应性。如果 N170 对声旁或整字语音加工敏感，预期将得到声旁相同或整字读音相同诱发的 N170 适应效应，如果 N170 对字形−语音对应加工的敏感，将会表现出对声旁和整字读音同时重复的神经适应。同理，实验二考察形旁和整字语义重复在 N170 上的神经适应性，考察 N170 对形旁、整字语义加工以及字形−语义加工的敏感性。结合两个实验的结果，能够深入揭示 N170 在汉字阅读中的作用。

2 实验 1：N170 对字形−语音加工的敏感性

2.1 方法

2.1.1 被试

被试为陕西师范大学 30 名在校大学生（15 名男生，15 名女生），平均年龄 20.3 岁（16~33 岁）。所有被试都是汉语母语者，右利手，视力或矫正视力正常。实验开始前每个被试都详

细阅读《被试知情同意书》并签字同意，实验结束后获得一定的报酬。

2.1.2 实验设计与材料

采用神经适应的实验范式，给被试连续呈现 4 个刺激材料，连续刺激之间的相同/相似属性会诱发加工该属性的神经活动产生适应性激活下降。本实验操纵了连续呈现的刺激材料之间的相似性，采用 2(声旁：相同/不同) x 2(整字读音：相同/不相同)的实验设计，构建出四种实验条件：O+P-条件，连续呈现的四个汉字(如：敏，侮，悔，莓)共享了相同的声旁，但整字读音各不相同，以考察相同声旁在字形加工上的神经适应性；O-P+条件，依次呈现的汉字(如：妹，枚，镁，莓)声旁各不相同，但整字读音相同，以考察整字读音相同诱发的神经适应性；O+P+条件的四个汉字(如：酶，梅，霉，莓)共享相同的声旁且整字读音相同，能同时考察声旁的字形相同和整字读音相同所诱发的神经适应性；O-P-条件，四个汉字(如：淮，崛，郎，莓)在声旁和整字读音都不存在相似性。通过条件对比，可以识别出声旁提供的字形、语音、以及字形−语音对应的加工。每个条件包含 50 组材料。四个条件共享了相同的目标字，前 3 个适应刺激的汉字在四个条件间匹配了平均频率($F(3,196)=0.03$, $p=0.994$, $\eta^2=0.0004$)、平均部件数($F(3,196)=1.09$, $p=0.355$, $\eta^2=0.02$)和平均笔画数($F(3,196)=1.37$, $p=0.253$, $\eta^2=0.02$)。另外，还匹配了四个条件间的左右结构汉字数($\chi^2_{(1)}=0.16$，$p=0.676$)、左形右声汉字数($\chi^2_{(1)}= 0.39$，$p=0.532$)。− 6 −

2.1.3 实验步骤

由于实验任务是要求被试默读所有汉字并对第 4 个汉字的读音进行判断，以确保被试能够进行语音通达的词汇阅读加工。本实验范式更接近主动任务下的 oddball 适应范式，参照前人 oddball 范式的实验程序(Brázdil et al., 2007; Madden, 2004; Hoversten et al., 2017)，ISI 大多设置在 1300~1600ms 之间。因此选择 4 个汉字呈现的 ISI 为 1600ms。具体实验流程见图 1，实验步骤如下：首先，让被试坐在距离屏幕舒适的位置（约 60cm）进行实验。实验开始时，先呈现“+”注视符 300ms，之后是空屏 200ms，接着依次呈现 4 个汉字，前三个汉字呈现 200ms，汉字之间间隔 1400ms，第四个汉字呈现 1000ms。接着呈现 2000ms 的“？”。被试的任务是默读每个汉字，并在看到“？”后，判断目标字的声母是否为“g”,若为“g”则按键盘上“g”键作反应。实验任务的确定有两个出发点，默读任务是为了限定被试完成从字形到语音的认知加工过程，而声母判断是为了确保被试完成了该阅读任务。整个实验中需要反应的试次只占 10%。实验分 3 个 run 进行，每个 run 之后被试可以休息一会儿，完成

整个实验大约需要半个小时。实验刺激呈现和数据收集使用 E-prime 2.0 实现。

A

条件	S1	S2	S3	Target
O+P+	招	沼	昭	诏
O-P+	找	罩	钊	诏
O+P-	迢	貂	绍	诏
O-P-	颁	胞	档	诏

B

条件	S1	S2	S3	Target
O+S+	狮	狼	狐	狒
O-S+	豹	鹿	羚	狒
O+S-	狡	狂	猜	狒
O-S-	颁	胞	档	狒

C

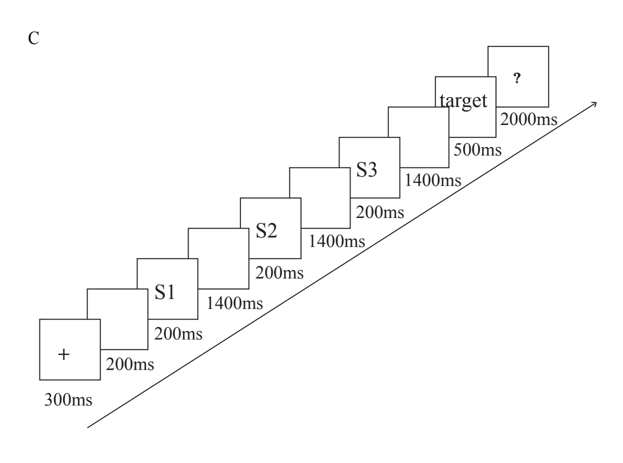


图 1 实验 1(A)和实验 2(B)四个实验条件下的材料举例，以及两个实验的流程图

2.1.4 事件相关脑电位(ERP)数据的记录

采用德国 Brain Products 公司的 ERP 记录系统，按国际 10-20 系统扩展的 64 导电极帽记录 EEG，以 FCz 作为参考电极，FPz 为接地电极。每个电极点的头皮电阻保持在 5KΩ 以下，滤波带通为 0.05~100Hz，采样率为 500Hz。数据锁时在每个汉字呈现的起始时间，以便清晰地记录每个汉字诱发的神经反应，从而探测出不同条件下的神经适应差异。

2.1.5 ERP 数据分析

EEG 的数据是在 MATLAB 环境下运行 eeglab 进行处理分析。在预处理中，对每个被试的数据首先进行 0.1~30Hz 的滤波，以全脑平均作为参考，接地点在 FPz 电极点。先将波幅超过±75μV 的波移除，再使用独立成分分析(ICA) (Delorme & Makeig, 2004)识别眼动和其他可能的伪迹并加以移除，预处理完成后，各条件平均有效 trial 比例为 83%。ERP 数据选取刺激呈现点之前 100ms 到之后 600ms 的时间窗口，以刺激点-100~0ms 作为基线校正，把刺激呈现后的 600ms 作为分析时程。

首先，通过对比刺激序列的四个汉字诱发的 N170 平均波幅来考察神经适应效应。根据前人研究中对 N170 成分的时间窗定义，以及本研究中原始波幅的结果，这里选取 160~220ms 作为分析的时间窗，通过计算该时间窗内最小值前后 10ms 的平均波幅，对比依次呈现的四

个汉字诱发的 N170 波幅差异。

然后，对比不同条件神经适应量的差异。神经适应量是通过计算差异波获得，即将第一个汉字诱发的 ERP 减去第二个汉字诱发的 ERP，差异越大表明两个连续刺激诱发的神经适应性越强，也即为该条件的神经适应量越大。在考察各个条件的神经适应量差异时，在左、右侧梭状回对应的 PO7 和 PO8 电极点上每 10ms 的数据进行统计，根据单因素 4 水平(4 个实验条件)重复测量方差分析的结果，按照连续 3 个或以上 F 检验 p 值小于 0.05 的标准，识别出在 PO7 电极点上连续显著的时间窗为 190~240ms，在 PO8 电极点上连续显著的时间窗为 210~240ms(如图 3 曲线中的阴影所示)。因此，在考察各条件神经适应量差异时，以 190~240ms 时间窗内的最小值前后 10ms 的数值来计算平均波幅。

2.2 结果

行为结果，在所有 30 名被试中，被试平均正确率为 96%，平均反应时为 510ms。实验中被试的按键反应是为了确保其认真完成任务，只需要对 10%的试次反应，这里不再按条件对行为数据进行统计分析。在 ERP 数据处理时，有 2 名被试的 ERP 数据由于头动比较厉害，预处理之后保留下来的有效试次不足 50%，因而将这两名被试的数据移除，最后只保留了 28 名被试的数据纳入统计分析。纳入分析的数据中，各实验条件平均保留了 83%的有效试次。ERP 数据结果发现，左侧和右侧枕颞叶区域的电极点（PO7，P7，P5；PO8，P8，P6）反应模式是相似的，因此，之后的原始波幅以及神经适应量的分析中，左右半球分别以 PO7 和 PO8 电极点为代表进行。

2.2.1 刺激序列的神经适应性

分析实验条件诱发的原始波，发现每个条件下的四个汉字的 ERP 反应在左侧和右侧枕颞叶脑区的模式相同。PO7 和 PO8 电极点（见图 2）有着相同的神经适应模式：第一个汉字引起了最大的神经反应，而第二、三个汉字所诱发的神经电位波幅明显要小。第四个汉字是目标刺激，被试需要对该字进行语音任务的加工。任务会影响到汉字自动诱发的脑电活动，事实上，与第二和第三个汉字相比，第四个汉字诱发的神经电位的确出现反弹。对四个汉字诱发的 N170 平均波幅进行多重比较的结果详见附表 1 和附表 2。为了更好地探讨神经适应，在进行条件对比时，主要将第二个刺激与第一个刺激的差异作为大脑对刺激的神经适应量。

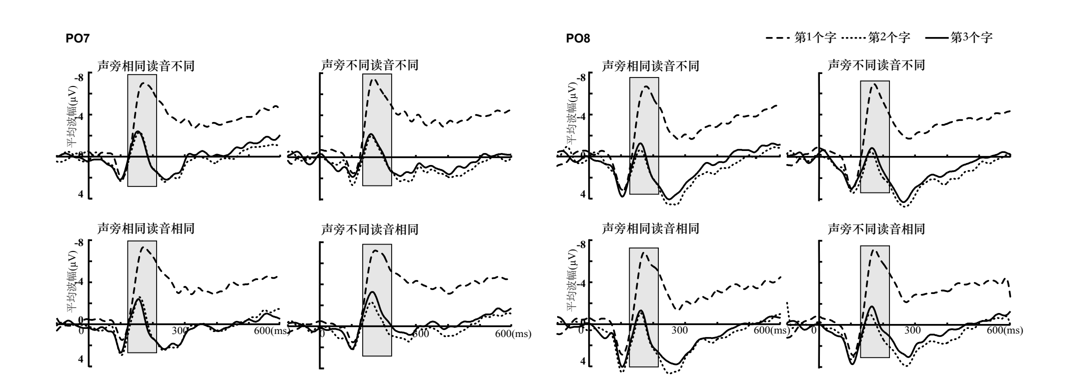


图 2 实验 1 的四个条件在 PO7 和 PO8 电极点上都表现出神经适应

2.2.2 N170 神经适应的条件差异

为进一步考察各条件诱发 N170 的平均波幅差异，首先进行了 2(声旁：相同/不同) x 2(整字读音：相同/不相同) x 2(半球：左/右)的三因素重复测量方差分析。结果仅发现了显著的整字读音主效应($F(1, 27) = 8.54$, $p = 0.007$, $\eta^2 = 0.24$)，即整字读音相同比不相同诱发了更大的神经适应效应。结果没有发现显著的声旁和半球主效应，也没有发现任何交互作用($ps > 0.1$)。有研究表明，汉字加工会诱发左侧的 N170 反应(Lin et al., 2011)，也有研究表明汉字加工可能诱发双侧的 N170 反应(Cao et al., 2015)，与 N170 相关的梭状回脑区在汉字加工中的功能存在着半球不对称性，即右侧主要负责视觉分析，左侧梭状回才反映了正字法加工(Liu et al., 2008; Wang et al., 2011)。为具体考察双侧 N170 是否具有不同的神经适应性，接下来分别对左半球(PO7)和右半球(PO8)电极点的神经适应量进行 2(声旁：相同/不同) x 2(整字读音：相同/不相同)的重复测量方差分析。结果如图 3 所示，左半球(PO7)和右半球(PO8)电极点在 N170 上的神经适应量表现出不同的结果模式，具体结果如下：

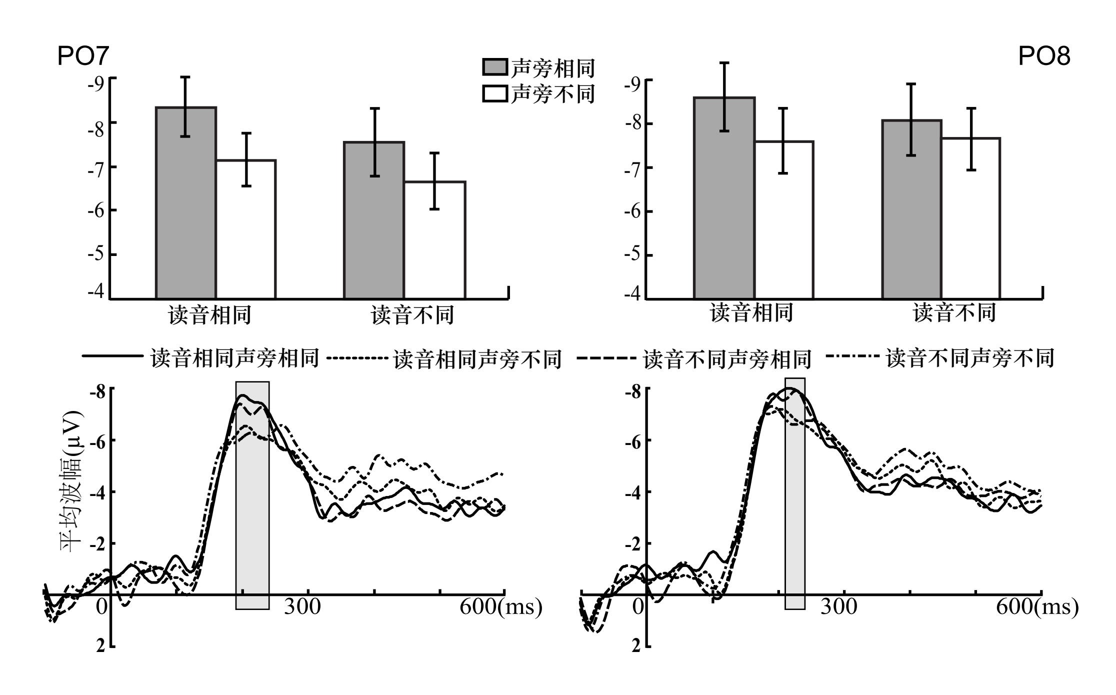


图 3 实验 1 发现左侧梭状回(PO7)神经适应的条件间差异，右侧(PO8)没有条件间差异

左侧电极点(PO7)的神经适应量 ANOVA 方差分析发现，声旁的神经适应主效应显著(F(1, 27) = 11.05, p = 0.003, η^2 = 0.29)，声旁相同比不同条件诱发了更大的神经适应量；整字读音的主效应显著(F(1, 27) = 6.47, p = 0.017, η^2 = 0.19)，整字读音相同条件下的神经适应量大于不相同条件。但是，声旁与整字读音相似性的交互作用不显著(F(1, 27) = 0.46, p = 0.501, η^2 = 0.02)。表明左侧 N170 对字形加工以及整字语音加工都敏感。

右侧电极点(PO8)的方差分析结果发现，声旁的神经适应性仅仅达到了边缘显著(F(1, 27) = 3.93, p = 0.058, η^2 = 0.13)，声旁相同比不同的条件诱发了更大的神经适应量；而整字读音的神经适应性(F(1, 27) = 0.53, p = 0.473, η^2 = 0.02)及其与声旁的神经适应的交互作用(F(1, 27) = 0.25, p = 0.306, η^2 = 0.04)都不显著。表明右侧 N170 不具有对语音加工或字形到语音加工的敏感性。

2.3 讨论

实验一操纵了连续呈现汉字之间的声旁和整字读音相似性，考察双侧颞枕区域 PO7 和 PO8 电极点上诱发 N170 的神经适应性反应，来探讨 N170 在汉字阅读中对字形、语音、以及字形−语音加工的敏感性。结果发现左侧 PO7 电极点的 N170 同时对声旁和整字读音诱发的神经适应敏感，而右侧 PO8 电极点上的 N170 仅在相同声旁的适应性达到了显著。

实验一的一个主要发现是在左侧颞枕区域的电极点上诱发的 N170 反应对汉字字形加工的敏感。这一结果与拼音文字的大量研究发现一致，只在左侧梭状回中部发现对字形加工的

敏感性(Bolger et al., 2005)。而以往的汉字阅读研究中，大量研究发现汉字阅读中具有梭状回的双侧化激活。尤其是来自 fMRI 的研究发现，汉字阅读加工诱发了双侧枕颞叶的激活(Krafnick et al., 2016; Mo et al., 2015; Zhao et al., 2016)。研究者认为这种双侧化主要是因为汉字具有复杂的视觉空间特性，因而需要右侧梭状回的参与激活(Bolger et al., 2005; Szwed et al., 2014)。

本实验的结果看起来与前人 fMRI 研究中的双侧梭状回激活并不一致，实验一只在左侧 PO7 电极点上表现出了字形的神经适应性，而在 PO8 电极点上的字形神经适应性仅达到边缘显著。这可能与具体的实验条件有关，因为这里的声旁不同整字读音不同条件更像是一个高水平基线，与它进行比较得到的是高水平的字形加工，排除了视觉分析加工的影响。从而导致右侧对视觉分析敏感的 PO8 电极点的字形适应效应不够显著。而且，本实验采用适应范式，从图 1 的结果可以看出，O-P-条件下依次呈现的三个刺激在 PO7 和 PO8 都表现出了明显的神经适应，虽然 O-P-条件下的汉字各不相同，但基本的视觉特征分析层面是相似的，从而诱发了视觉分析的神经适应，与 O-P-条件重复刺激的适应量进行差异对比就排除了这种视觉分析的影响。这一解释与前人在汉字阅读中发现的左侧 N170 结果是一致的，比如，Lin 等人(2011)的研究中发现真字和伪字都表现出左侧化的 N170 成分，而非字和笔画组合条件下并没有左侧化的趋势，真字和伪字的左侧化正是因为它们都需要抽象的正字法加工。因而，在排除视觉分析加工时，汉字阅读的字形加工仅表现在左侧的 N170 反应。

实验一的另一个发现是语音加工对 N170 反应具有调节作用。在 PO7 电极点上发现了显著的同音字的神经适应，表明 N170 对汉字阅读的语音加工敏感。这一结果与前人关于汉字诱发的 N170 的结果是一致的，比如，Lee 等人(2007)发现 N170 波幅表现出形声字阅读的声旁家族读音一致性效应，声旁家族成员读音一致性较低的汉字比一致性高的汉字诱发了更大的 N170 波幅(Lee et al., 2007)。N170 的声旁读音一致性效应反映了声旁家族读音被自动激活并影响了形声字的阅读加工，N170 受形声字的声旁家族影响还表现在其波幅受到了声旁家族大小的影响(Hsu et al., 2009)。形声字阅读诱发的 N170 对声旁家族敏感表明其反应受到了语音加工的调节，为梭状回对词汇的语音加工敏感提供了间接的证据。

实验一的结果为语音加工对 N170 的调节提供了直接的证据。在适应范式下，连续呈现的同音汉字会诱发与语音加工相关脑区的神经适应，本实验发现 PO7 在整字读音的适应效应，直接证明左侧颞枕区域的 N170 对整字读音具有敏感性。这一结果与 fMRI 研究关于左

侧颞枕区域在阅读中的激活结果相同，如 Xue 等人(2006)对人工语言（韩语）学习的研究发现对被试进行词形、语音和语义的训练后，发现左侧梭状回中部在语音训练后的激活显著大于训练前。本实验的适应范式与 Xue 等人(2006)的人工语言学习范式不同，采用的实验技术也不同，从不同角度都为梭状回的语音加工敏感性提供了直接的实验证据。

但是，实验一发现 N170 语音敏感性具有明显的左侧化。整字读音的适应效应表现在左侧 PO7 电极点上，并没有表现在右侧 PO8 电极点上。这一结果不仅与汉字语音加工的左侧化结果一致(Xue et al., 2006)，还表现出跨语言的普遍性。拼音文字的阅读研究中，对正常被试的研究发现右脑缺乏字形−语音转换的能力，Lindell 和 Lum (2008)使用内隐和外显的语音任务，操纵启动词和目标词之间字形和语音的相似性，结果发现只有左半球可以进行字形−语音的转换并产生语音表征。对 N170 成分进行分析得出左侧化的词汇相关的 N170 被认为与形−音转换和语音映射加工相关(Proverbio & Zani, 2003; Maurer & McCandliss, 2007)。有研究使用日语片假名以及新异片假名表示的日本汉字，两种材料只在视觉熟悉性上存在差异，但是字形−语音的编码过程无差异。结果得出两种材料诱发了无差异左侧化的 N170，表明左侧化 N170 与形音转换或语音映射（phonological mapping）有关(Maurer et al., 2008)。

而且，区别于拼音文字系统的研究结果，实验一没有发现 N170 对字形−语音转换加工敏感。本实验仅在 PO7 上发现了字形和整字读音的神经适应，并没有发现二者的交互作用。N170 对整字读音和字形相似性都表现出神经适应，并没有表现出对声旁相同+整字同音条件下特殊的神经适应，从而表明 N170 在汉字阅读中并没有对字形−语音转换加工敏感。这可能与汉字阅读区别于拼音文字的字形−语音转换的本质相关(Yang et al., 2009)。汉字阅读的形−音加工在本质上还是声旁和整字读音的对应关系，是在整字水平的读音对应关系，并不是拼音文字系统的由形素拼读出音素的对应关系，因此，实验一并没有发现 N170 对字形−语音转换加工的独特性敏感。

综上，实验一发现了左侧 N170 同时对汉字阅读的字形加工和语音加工敏感，与前人的汉字研究以及拼音文字研究具有一致性。但是，汉字具有系统地字形到语义的对应，利用神经适应范式探讨 N170 及其相关的大脑梭状回在汉字阅读中语义加工的敏感性是本研究感兴趣的问题，实验二进一步探讨 N170 对汉字阅读中语义加工的敏感性。

3 实验二：N170 对字形−语义加工的敏感性

3.1 方法

3.1.1 被试

实验一的 30 名被试同时参与了实验二的任务。所有被试都是先完成实验一的任务之后休息 5 分钟，再完成实验二的任务。

3.1.2 实验设计和材料

本实验采用与实验 1 相同的神经适应范式。通过操纵连续呈现刺激材料的相似性，探讨汉字阅读中的字形和语义加工的神经适应性。形成 2 (形旁：相同/不同) x 2(整字语义：相关/不相关)的实验设计，语义相关是指连续呈现的 4 个汉字同属于相同的语义范畴，不相关条件是语义范畴不同的 4 个汉字。四种实验条件分别是：O+S-条件，依次呈现的四个汉字(如：狡，狂，猜，狒)共享了相同的形旁，但是四个汉字的语义没有相关性。O-S+条件的四个汉字(如：豹，鹿，羚，狒)形旁各不相同，但整字语义具有相关性。O+S+条件下的四个汉字(如：狮，狼，狐，狒)不仅共享相同的形旁，而且整字语义也相关。O-S-条件是控制条件，四个汉字(如：淮，崛，郎，狒)在形旁和整字语义上都不存在相似性。同时，O-S-条件与实验一的 O-P-条件都是控制条件，为了节省实验时间，O-S-条件直接使用了实验一的 O-P-条件。通过条件对比，就可以识别出形旁提供的字形、语义、以及字形−语义对应的加工。每个条件包含 54 组材料。四个条件共享了相同的目标字，前 3 个适应刺激的汉字在四个条件间匹配了平均频率(F(3,208)=0.88, p=0.451, η^2=0.01)、平均部件数(F(3,208)=1.08, p=0.361, η^2=0.02)和平均笔画数(F(3,208)=0.45, p=0.721, η^2=0.01)。另外，还匹配了四个条件间的左右结构汉字数($\chi^2_{(1)}$=2.19，p=0.139)、左形右声汉字数($\chi^2_{(1)}$=2.25，p=0.133)。

3.1.3 程序和任务

实验程序和实验一相同，被试的任务是默读所有汉字，并判断目标汉字（第四个汉字）的声母是否为“j”，若是，则按“j”键反应。

3.1.4 ERP 数据记录和处理

ERP 的数据记录和处理和实验一完全相同。

与实验一相同，先以 160~220ms 的时间窗来考察刺激序列在 N170 上产生的神经适应。然后在 PO7 和 PO8 电极点上每 10ms 进行统计，根据单因素 4 水平(即实验条件)重复测量方差分析的结果，按照连续 3 个或以上步长的 F 检验 p 值小于 0.05 的标准，识别出在 PO7 电极点上连续显著的时间窗为 180~240ms，在 PO8 电极点上连续显著的时间窗为

170~300ms(如图 5 曲线中的阴影所示)。在计算各条件神经适应量时，以 170~300ms 时间窗内的最小值前后 10ms 的数值来计算平均波幅。

3.2 结果

与实验一相同，被试的行为数据仅统计了总体结果，平均正确率为 96%，平均反应时为 510ms。在分析 ERP 数据时，2 名被试的数据经过预处理之后有效试次不足 50%被移除，最后纳入统计分析的共有 28 名被试的数据。纳入分析的数据中，各实验条件平均保留了 87%的有效试次。

ERP 的结果与实验 1 相同，在原始波幅上(如图 4 所示)所有条件下都表现出神经适应性。对四个汉字诱发的 N170 平均波幅进行多重比较的结果详见附表 3(PO7)和附表 4(PO8)。后面的三个汉字都比第 1 个汉字诱发了更弱的 N170 反应，表现出神经适应，第 2 个与第 3 个汉字诱发的 N170 反应没有差异，第 4 个汉字由于受到任务的影响表现出在 N170 波幅上的反弹。

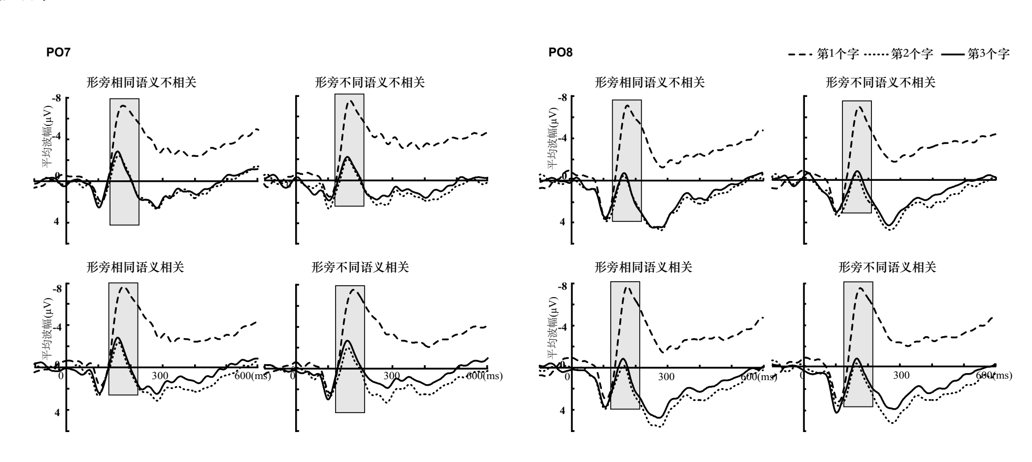


图 4 实验 2 在 PO7 和 PO8 电极点上的四个条件上都表现出神经适应性

3.2.1 N170 神经适应的条件差异

实验二的条件对比同样先进行了 2(形旁：相同/不同) x 2(整字语义：相关/不相关) x 2(半球：左/右)的三因素重复测量方差分析。结果发现形旁主效应达到了边缘显著($F(1, 27) = 4.07$, $p = 0.054$, $\eta^2 = 0.13$)，形旁相同比不相同诱发了更大的神经适应。结果还发现了显著的整字语义相关的主效应($F(1, 27) = 4.73$, $p = 0.039$, $\eta^2 = 0.15$)，语义相关比不相关条件诱发了更大的神经适应。而且，左右半球主效应也显著($F(1, 27) = 14.47$, $p = 0.001$, $\eta^2 = 0.35$)，右侧比左侧电极点上产生的神经适应量要更大。但是，只有形旁和整字语义相关的交互作用达到了显著($F(1, 27) = 12.20$, $p = 0.002$, $\eta^2 = 0.31$)，其它的交互作用都不显著($ps > 0.10$)。为了进一步

探究左右半球上形旁和整字语义效应的具体表现，接下来分别在 PO7 和 PO8 电极上进行 2(形旁：相同/不同) x 2(整字语义：相关/不相关)的重复测量方差分析，结果如下（见图 5）：

在左侧电极点(PO7)，N170 的神经适应量仅表现出整字语义相关性的主效应，语义相关比不相关的刺激序列产生了更大的神经适应($F(1, 27) = 11.14, p = 0.002, \eta^2 = 0.29$)；而形旁主效应($F(1, 27) = 0.32, p = 0.576, \eta^2 = 0.01$)及其与整字语义相关的交互作用($F(1, 27) = 0.11, p = 0.740, \eta^2 = 0.004$)都不显著。

在右侧电极点(PO8)，N170 的神经适应量既表现出形旁的主效应($F(1, 27) = 11.87, p = 0.002, \eta^2 = 0.31$)，即形旁相同比不相同产生的神经适应量更大；也表现出整字语义相关的神经适应($F(1, 27) = 12.30, p = 0.002, \eta^2 = 0.32$)，语义相关比不相关产生的神经适应量更大。但是，形旁相同与整字语义相关的交互作用不显著($F(1, 27) = 0.07, p = 0.790, \eta^2 = 0.003$)。

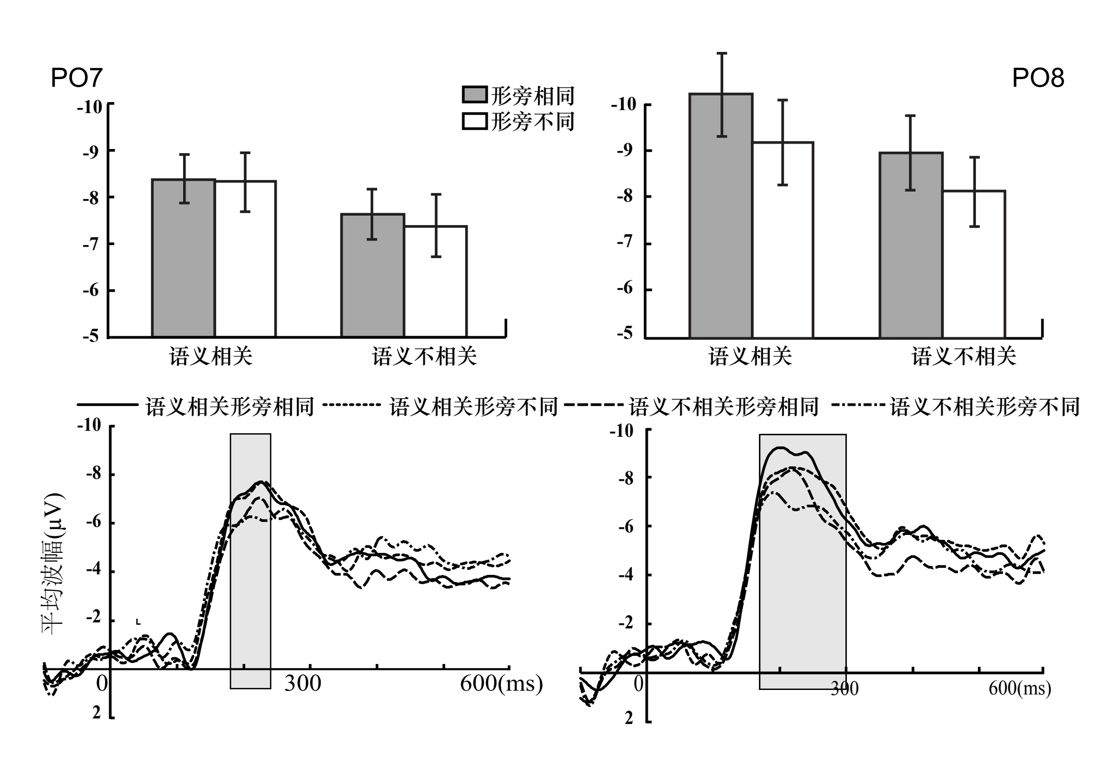


图 5 实验 2 的左侧(PO7)和右侧梭状回(PO8)都表现出神经适应的条件间差异。

3.3 讨论

实验 2 操纵了连续呈现汉字之间的形旁和整字语义相关，观察其诱发的双侧颞枕区域电极点的 N170 神经适应，致力于探讨 N170 及其相关的大脑双侧梭状回在汉字阅读中对字形、语义以及字形−语义对应加工中的作用。结果发现左侧 PO7 电极点在整字语义相关上存在神经适应主效应，而右侧的 PO8 电极点对形旁和整字语义相关诱发的神经适应主效应都显著，双侧电极点(PO7 和 PO8)都没有发现形旁和整字语义相关的神经适应之间的交互作用。

结果表明了语义加工对双侧 N170 起到了调节作用，而字形到语义的对应加工并没有在 N170 适应性上得到体现。

实验二发现的一个有意义的结果是双侧 N170 都表现出整字语义相关上的神经适应。这个结果与大多数汉字 fMRI 研究结果一致，如 Booth 等人(2006)使用语义相关判断任务对语义表征进行探究，发现在语义任务中激活的脑区包括双侧梭状回脑区。Liu 等人(2008) 使用内隐的任务对 VWFA 在汉字中的定位和功能进行研究，结果发现真字和假字引起了双侧枕颞叶脑区的激活。Siok 等人(2004) 通过语音和词汇判断两种任务对正常被试和阅读障碍被试进行比较，结果发现在字形–语义对应任务激活的脑区包括双侧梭状回，且具有被试间一致性。

实验二发现的梭状回对整字语义存在神经适应与大多数拼音文字阅读的 fMRI 研究结果并不一致。一些拼音文字的研究并没有发现梭状回的语义效应，如 Devlin 等人(2006)使用启动范式，操纵启动词和目标词之间字形和语义关系，结果发现左侧梭状回存在显著的字形启动效应，但没有发现语义启动效应。Raposo 等人(2006)的研究中操纵启动词和目标词之间的三种关系（重复，语义相关，语义不相关），对语义相关性进行分析时也没有发现梭状回脑区的参与。

但也有些拼音文字的研究结果与本研究结果一致，即发现了左侧梭状回脑区的语义效应(Gold et al., 2006)。如 Wheatley 等人(2005)操纵启动词和目标词之间的三种关系（重复，语义相关，语义不相关），结果发现左侧梭状回后部和额下皮层受到字对关系的调节，语义相关字对的激活低于不相关字对。Wang 等人(2018)使用语义分类任务发现语义加工的确能影响到左侧梭状回中部的激活，从而认为左侧梭状回中部参与了词汇语义信息的加工。而且，语义加工对梭状回脑区作用的左侧化也得到了 ERP 研究的证据支持。如 Hauk 等人(2006)发现 160ms 左右（N170）只有在左侧脑区存在词汇语义信息的差异。在一项最近的研究中，Davis 等人(2019)也发现左侧脑区的语义效应在早期成分（P100）已经显现，并且一直持续到 N400 成分。上述结果与实验二在左侧 PO7 电极点上发现的 N170 在整字语义上的适应效应相一致。

实验二的结果与拼音文字研究的结果存在不一致的地方，就是实验二得到双侧电极点都表现出了整字语义的神经适应。这种差异可能与汉字的表义性有关，从而导致了加工汉字时除了激活左侧颞枕区域，还需要右侧颞枕区域的参与激活。如 Booth 等人(2006)发现词汇

语义判断任务下激活了双侧梭状回脑区。Liu 等人(2008) 使用内隐的任务也发现发现真字和假字都引起了双侧枕颞叶脑区的激活。实验二的结果在脑区的神经适应性上，发现 PO7 和 PO8 电极上都表现出整字语义相关的神经适应性，从而表明语义加工的确对 N170 及其相关的大脑梭状回激活具有调节作用。

实验二的独特之处是试图分离字形加工、整字语义以及字形−语义的对应加工。结果发现，左侧的 PO7 电极点上只有整字语义相关的主效应，而右侧的 PO8 电极点同时表现出整字语义以及形旁的神经适应主效应，双侧电极点都没有表现出形旁和整字语义相关的交互作用。实验二形旁相同条件诱发的神经适应性具有两种可能性，一种可能是字形相同诱发的神经适应，另一种可能是形旁独特的字形−语义的映射加工诱发的神经适应。只有形旁相同与整字语义的交互作用才能表明字形−语义加工的神经适应性。遗憾的是，在双侧电极点上都没有发现显著的交互作用，从而没有探测到双侧梭状回对字形−语义加工的敏感性。

有趣的是，实验二发现形旁相同诱发的神经适应性仅表现在右侧电极点 PO8 上。由于双侧电极点上都没有显著的形旁和整字语义神经适应的交互作用，PO8 电极点上发现的形旁神经适应反映了形旁加工诱发的神经适应。一方面反映了右侧 N170 对形旁加工的敏感性。另一方面还可能反映了右侧 N170 对形旁与语义对应加工更敏感。只是这种字形−语义转换加工需要与高水平的语义脑区联结才能完成，从而在 PO8 电极点上仅能体现出对形旁的敏感。这种推测还需要借助 fMRI 等脑成像技术进一步对脑区功能及其脑区联结进行深入探讨。

4 综合讨论

梭状回在词汇阅读中的功能受到了研究者的广泛关注，本研究通过两个神经适应范式下的 ERP 实验，系统探讨了 N170 及其相关的梭状回区域在汉字阅读中是否对高水平的语音(实验一)和语义加工(实验二)敏感。实验一发现左侧 N170 对汉字的声旁和整字读音敏感；实验二发现左侧 N170 对整字语义加工敏感，右侧 N170 同时对形旁和整字语义加工敏感。下面结合两个实验的结果发现对 N170 及其相关的大脑梭状回在汉字阅读中的作用进行讨论。

首先，梭状回参与了汉字字形加工并且具有双侧化的特点。本研究的两个实验从连续刺激汉字诱发的神经适应性上，发现与双侧梭状回对应的 PO7 和 PO8 电极上都表现出对汉字刺激的神经适应性。就算是没有共享部件或整字信息的汉字之间，也都诱发了比较强的神经

适应性(见图 2 和图 4 的控制条件)，而且两个实验的结果完全一致。这个结果与汉字阅读加工会诱发双侧梭状回的 N170 结果一致(Hsiao et al., 2007; Lee et al., 2007)，也与 fMRI 研究中发现的汉字阅读中双侧梭状回的参与激活一致(Booth et al., 2006; Liu et al., 2008; Krafnick et al., 2016; Mo et al., 2015)。例如，在 Wang 等人(2011)的研究中，就算是乱笔画组成的类似汉字的符号刺激，也同样激活了汉字阅读的神经网络，在梭状回上表现出比真字更强的激活。本研究与前人的研究一致支持了双侧梭状回参与了汉字阅读的字形加工。

其次，左侧梭状回也参与了汉字阅读的语音加工。研究者认为，左侧梭状回可能涉及了抽象的视觉形式与更高语言特征的融合(Devlin et al., 2006)。Price 和 Devlin (2011)提出语音等高水平语言加工可能对视觉词汇阅读的早期字形加工起到了调制作用，从而左侧梭状回的活动具有对语音加工的敏感性。对汉字阅读神经机制的研究也发现，左侧枕颞交接区不仅处于字形加工网络中，还和其他脑区一起共同参与了语音加工(Kuo et al., 2004)。来自儿童阅读发展的研究表明，个体的语音意识可以预测 N170 成分的左侧化程度(Sacchi & Laszlo, 2016)，主要是因为伴随着阅读发展，需要左侧的听觉语言脑区执行字形和语音之间连接。Xue 等人(2006)采用人工语言（韩语）训练被试识别视觉词形，语音和语义信息，结果发现左侧梭状回中部在进行语音训练后的激活显著大于训练前，表明该脑区参与了视觉词形与语音信息的联想学习。本研究发现左侧梭状回对汉字的声旁和整字读音敏感，支持了左侧梭状回在汉字阅读中具有对语音加工敏感的观点。

最后，梭状回还可能参与了汉字阅读的语义加工。受限于拼音文字系统的表义局限性，拼音文字的研究不能直接探讨字形−语义加工，只能借助于任务对比来探讨语义加工对于梭状回的调节作用(Pattamadilok et al., 2017; Segalowitz & Zheng, 2009)。而汉字具有形旁表义的独特性，从而研究者可以直接操纵汉字形旁来探讨了词汇阅读的神经机制(Wang et al., 2011; Yang et al., 2011, 2012; Wang et al., 2016)。但是，目前还没有研究直接操纵形旁来探讨字形−语义的对应加工，更没有研究表明汉字功能部件(声旁与形旁)在加工上具有不同的神经机制。本研究利用神经适应范式对亚词汇信息的敏感性，操纵连续呈现汉字的形旁，探讨形旁的语义加工在汉字阅读中的作用，结果发现左侧梭状回对应的 PO7 电极点对汉字整字语义加工敏感，而右侧梭状回相应的 PO8 电极点同时对形旁和整字语义加工敏感，从而表明梭状回可能参与了汉字阅读中的语义加工。

本研究在适应范式下能够深入地探讨汉字亚词汇的语音、语义加工。神经适应范式已经

在视觉词汇加工(Glezer et al., 2009)以及语音研究(Glezer et al., 2016)中得到了应用，能很好的研究刺激特性诱发的大脑表征机制。本研究将神经适应范式与 ERP 技术相结合，体现出明显的优势。已往研究在探讨阅读的语音加工时，很难将亚词汇水平的字形–语音加工与字形和语音加工分开，而通过神经适应范式，能够很好地区分出字形、语音以及二者转换加工所产生的神经适应性。以此原理，也能很好地区分出字形、语义以及二者的转换加工。在神经适应的实验范式下，本研究探讨了汉字阅读中功能部件(声旁和形旁)敏感的神经机制。结果发现左侧梭状回对应的 N170 具有对声旁的敏感性，而右侧梭状回对应的 N170 具有对形旁加工的的敏感性。这一结果为 Hsiao 等人(2007)在左右侧 N170 上发现的左形右声、左声右形汉字的不同模式提供了机制解释。借助神经适应范式，汉字亚词汇加工机制能够得到更加细致地探讨，如果将适应范式与 fMRI 技术相结合，可以深入揭示汉字亚词汇加工的神经机制，本研究也将探索该研究途径的可能性。

5 结论

总之，本研究利用汉字形声字的独特性，结合脑电活动的神经适应性对N170及其对应的梭状回在汉字阅读中的作用进行了系统探讨，结果发现N170不仅参与字形加工，还参与语音和语义的加工，并表现出语音加工的左侧化和语义加工的双侧化。

参考文献

Binder, J. R., Medler, D. A., Westbury, C. F., Liebenthal, E., & Buchanan, L. (2006). Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *Neuroimage*, *33*(2), 739–748.

Bolger, D. J., Perfetti, C. A., & Schneider, W. (2005). Cross-cultural effect on the brain revisited: universal structures plus writing system variation. *Human Brain Mapping*, *25*(1), 92–104.

Booth, J. R., Lu, D., Burman, D. D., Chou, T.-L., Jin, Z., Peng, D.-L., … Liu, L. (2006). Specialization of phonological and semantic processing in Chinese word reading. *Brain Research*, *1071*(1), 197–207.

Brázdil, M., Mikl, M., Mareček, R., Krupa, P., & Rektor, I. (2007). Effective connectivity in target stimulus processing: a dynamic causal modeling study of visual oddball task. *Neuroimage*, *35*(2), 827–835.

Cao, X., Ma, X., & Qi, C. (2015). N170 adaptation effect for repeated faces and words. *Neuroscience*, *294*, 21–28.

Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M.-A., & Michel, F. (2000). The visual word form area. *Brain*, *123*(2), 291–307.

Davis, C. P., Libben, G., & Segalowitz, S. J. (2019). Compounding matters: event-related potential evidence for early semantic access to compound words. *Cognition*, *184*, 44–52.

Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(6), 254–262.

Delorme, A., & Makeig, S. (2004) EEGLAB: an open source toolbox for analysis of single-trial EEG dynamics including independent component analysis. *Journal of Neuroscience Methods*, *134*, 9–21

Devlin, J. T., Jamison, H. L., Gonnerman, L. M., & Matthews, P. M. (2006). The role of the posterior fusiform gyrus in reading. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *18*(6), 911–922.

Eulitz, C., Eulitz, H., Maess, B., Cohen, R., Pantev, C., & Elbert, T. (2000). Magnetic brain activity evoked and induced by visually presented words and nonverbal stimuli. *Psychophysiology*, *37*(4), 447–455.

Fraga González, G., Žarić, G., Tijms, J., Bonte, M., Blomert, L., Leppänen, P., & van der Molen, M. W. (2016). Responsivity to dyslexia training indexed by the N170 amplitude of the brain potential elicited by word reading. *Brain and Cognition*, *106*, 42–54.

Glezer, L. S., Eden, G., Jiang, X., Luetje, M., Napoliello, E., Kim, J., & Riesenhuber, M. (2016). Uncovering phonological and orthographic selectivity across the reading network using fMRI-RA. *Neuroimage*, *138*, 248–256.

Glezer, L. S., Jiang, X., & Riesenhuber, M. (2009). Evidence for highly selective neuronal tuning to whole words in the “Visual Word Form Area”. *Neuron*, *62*(2), 199–204.

Gold, B. T., Balota, D. A., Jones, S. J., Powell, D. K., Smith, C. D., & Andersen, A. H. (2006). Dissociation of automatic and strategic lexical-semantics: functional magnetic resonance imaging evidence for differing roles of multiple frontotemporal regions. *Journal of Neuroscience, 26*(24), 6523–6532.

Hauk, O., Davis, M. H., Ford, M., Pulvermüller, F., & Marslen-Wilson, W. D. (2006). The time course of visual word recognition as revealed by linear regression analysis of ERP data. *Neuroimage*, *30*(4), 1383–1400.

Hoversten, L. J., Brothers, T., Swaab, T. Y., & Traxler, M. J. (2017). Early processing of orthographic language membership information in bilingual visual word recognition: evidence from ERPs. *Neuropsychologia*, *103*, 183–190.

Hsiao, J. H., Shillcock, R., & Lee, C. (2007). Neural correlates of foveal splitting in reading: evidence from an ERP study of Chinese character recognition. *Neuropsychologia*, *45*(6), 1280–1292.

Hsu, C., Tsai, J., Lee, C., & Tzeng, O. (2009). Orthographic combinability and phonological consistency effects in reading Chinese phonograms: an event-related potential study. *Brain and Language*, *108*(1), 56–66.

Kim, K. H., Yoon, H. W., & Park, H. W. (2004). Spatiotemporal brain activation pattern during word/picture perception by native Koreans. *Neuroreport*, *15*(7), 1099–1103.

Krafnick, A. J., Tan, L.-H., Flowers, D. L., Luetje, M. M., Napoliello, E. M., Siok, W.-T., … Eden, G. F. (2016). Chinese character and English word processing in children's ventral occipitotemporal cortex: fMRI evidence for script invariance. *Neuroimage*, *133*, 302–312.

Krekelberg, B., Boynton, G. M., & van Wezel, R. J. A. (2006). Adaptation: from single cells to BOLD signals. *Trends in Neurosciences*, *29*(5), 250–256.

Kuo, W.-J., Yeh, T.-C., Lee, J.-R., Chen, L.-F., Lee, P.-L., Chen, S.-S., … Hsieh, J.-C. (2004). Orthographic and phonological processing of Chinese characters: an fMRI study. *Neuroimage*, *21*(4), 1721–1731.

Lee, C.-Y., Tsai, J.-L., Chan, W.-H., Hsu, C.-H., Hung, D. L., & Tzeng, O. J. L. (2007). Temporal dynamics of the consistency effect in reading Chinese: an event-related potentials study. *NeuroReport*, *18*(2), 147–151.

Lindell, A. K., & Lum, J. A. G. (2008). Priming vs. rhyming: orthographic and phonological representations in the left and right hemispheres. *Brain and Cognition*, *68*(2), 193–203.

Lin, S. E., Chen, H. C., Zhao, J., Li, S., He, S., & Weng, X. C. (2011). Left-lateralized N170 response to unpronounceable pseudo but not false Chinese characters—the key role of orthography. *Neuroscience*, *190*, 200–206.

Liu, C., Zhang, W.-T., Tang, Y.-Y., Mai, X.-Q., Chen, H.-C., Tardif, T., & Luo, Y.-J. (2008). The visual word form area: evidence from an fMRI study of implicit processing of Chinese characters. *Neuroimage*, *40*(3), 1350–1361.

Lu, Q., Tang, Y.-Y., Zhou, L., & Yu, Q. (2011). The different time courses of reading different levels of Chinese characters: an ERP study. *Neuroscience Letters*, *498*(3), 194–198.

Madden, D. J. (2004). Age-related changes in neural activity during visual target detection measured by fMRI. *Cerebral Cortex*, *14*(2), 143–155.

Maurer, U., Brem, S., Bucher, K., & Brandeis, D. (2005). Emerging neurophysiological specialization for letter strings. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(10), 1532–1552.

Maurer, U., & McCandliss, B. D. (2007). The development of visual expertise for words: the contribution of electrophysiology. In E. L. Grigorenko & A. J. Naples (Eds.), Single-word reading: behavioral and biological perspectives. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

Maurer, U., Zevin, J. D., & McCandliss, B. D. (2008). Left-lateralized N170 effects of visual expertise in reading: evidence from Japanese syllabic and logographic scripts. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(10), 1878–1891.

Mechelli, A., Sartori, G., Orlandi, P., & Price, C. J. (2006). Semantic relevance explains category effects in medial fusiform gyri. *Neuroimage*, *30*(3), 992–1002.

Mei, L., Xue, G., Lu, Z.-L., He, Q., Zhang, M., Xue, F., … Dong, Q. (2013). Orthographic transparency modulates the functional asymmetry in the fusiform cortex: an artificial language training study. *Brain and Language*, *125*(2), 165–172.

Mo, C., Yu, M., Seger, C., & Mo, L. (2015). Holistic neural coding of Chinese character forms in bilateral ventral visual system. *Brain and Language*, *141*, 28–34.

Pattamadilok, C., Chanoine, V., Pallier, C., Anton, J.-L., Nazarian, B., Belin, P., & Ziegler, J. C. (2017). Automaticity of phonological and semantic processing during visual word recognition. *Neuroimage*, *149*, 244–255.

Price, C. J., & Devlin, J. T. (2011). The interactive account of ventral occipitotemporal contributions to reading. *Trends in Cognitive Sciences*, *15*(6), 246–253.

Proverbio, A. M., & Zani, A. (2003). Time course of brain activation during graphemic/phonologic processing in reading: an ERP study. *Brain and Language*, *87*(3), 412–420.

Raposo, A., Moss, H. E., Stamatakis, E. A., & Tyler, L. K. (2006). Repetition suppression and semantic enhancement: an investigation of the neural correlates of priming. *Neuropsychologia*, *44*(12), 2284–2295.

Rossion, B., Joyce, C. A., Cottrell, G. W., & Tarr, M. J. (2003). Early lateralization and orientation tuning for face, word, and object processing in the visual cortex. *Neuroimage*, *20*(3), 1609–1624.

Sacchi, E., & Laszlo, S. (2016). An event-related potential study of the relationship between N170 lateralization and phonological awareness in developing readers. *Neuropsychologia*, *91*, 415–425.

Saygin, Z. M., Osher, D. E., Norton, E. S., Youssoufian, D. A., Beach, S. D., Feather, J., … Kanwisher, N. (2016). Connectivity precedes function in the development of the visual word form area. *Nature Neuroscience*, *19*(9), 1250–1255.

Scott, G. G., O'Donnell, P. J., Leuthold, H., & Sereno, S. C. (2009). Early emotion word processing: evidence from event-related potentials. *Biological Psychology*, *80*(1), 95–104.

Segalowitz, S. J., & Zheng, X. (2009). An ERP study of category priming: evidence of early lexical semantic access. *Biological Psychology*, *80*(1), 122–129.

Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., … Gore, J. C. (2002). Disruption of posterior brain systems for reading in children with developmental dyslexia. *Biological Psychiatry*, *52(2)*, 101–110.

Siok, W. T., Perfetti, C. A., Jin, Z., & Tan, L. H. (2004). Biological abnormality of impaired reading is constrained by culture. *Nature*, *431*(7004), 71-76.

Szwed, M., Qiao, E., Jobert, A., Dehaene, S., & Cohen, L. (2014). Effects of literacy in early visual and occipitotemporal areas of Chinese and French readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*(3), 459–475.

Tan, L. H., Liu, H.-L., Perfetti, C. A., Spinks, J. A., Fox, P. T., & Gao, J.-H. (2001). The neural system underlying Chinese logograph reading. *Neuroimage*, *13*(5), 836–846.

Temple, E., Deutsch, G. K., Poldrack, R. A., Miller, S. L., Tallal, P., Merzenich, M. M., & Gabrieli, J. D. E. (2003). Neural deficits in children with dyslexia ameliorated by behavioral remediation: evidence from functional MRI. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *100*(5), 2860–2865.

Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J. P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, *55*(1), 143–156.

Wang, X., Shu, H., & Yang, J. (2010). Visual word form area and its functional role in the neural network of reading. *Advances in Psychological Science*, *18*(8), 1199–1207. [王小娟，舒华，杨剑峰. (2010). 大脑视觉词形区及其在阅读神经网络中的作用. *心理科学进展*, *18*(8), 1199–1207.]

Wang, X., Xu, Y., Wang, Y., Zeng, Y., Zhang, J., Ling, Z., & Bi, Y. (2018). Representational similarity analysis reveals task-dependent semantic influence of the visual word form area. *Scientific Reports*, *8*(1), 3047.

Wang, X., Yang, J., Shu, H., & Zevin, J. D. (2011). Left fusiform BOLD responses are inversely related to word-likeness in a one-back task. *Neuroimage*, *55*(3), 1346–1356.

Wang, X., Zhao, R., Zevin, J. D., & Yang, J. (2016). The neural correlates of the interaction between semantic and phonological processing for Chinese character reading. *Frontiers in Psychology*, *7*(518).

Wheatley, T., Weisberg, J., Beauchamp, M. S., & Martin, A. (2005). Automatic priming of semantically related words reduces activity in the fusiform gyrus. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *17*(12), 1871–1885.

Xue, G., Chen, C., Jin, Z., & Dong, Q. (2006). Language experience shapes fusiform activation when processing a logographic artificial language: an fMRI training study. *Neuroimage*, *31*(3), 1315–1326.

Yang, J., Mccandliss, B. D., Shu, H., & Zevin, J. D. (2009). Simulating language-specific and language-general effects in a statistical learning model of Chinese reading. *Journal of Memory and Language*, *61*(2), 238–257.

Yang, J., Wang, X., Shu, H., & Zevin, J. D. (2011). Brain networks associated with sublexical properties of Chinese characters. *Brain and Language*, *119*(2), 68–79.

Yang, J., Wang, X., Shu, H., & Zevin, J. D. (2012). Task by stimulus interactions in brain responses during Chinese character processing. *Neuroimage*, *60*(2), 979–990.

Yum, Y. N., Law, S.-P., Su, I.-F., Lau, K.-Y. D., & Mo, K. N. (2014). An ERP study of effects of regularity and consistency in delayed naming and lexicality judgment in a logographic writing system. *Frontiers in Psychology*, *5*(5), 315.

Zhao, L., Chen, C., Shao, L., Wang, Y., Xiao, X., Chen, C., … Xue, G. (2016). Orthographic and phonological representations in the fusiform cortex. *Cerebral Cortex*.1–14.

Zhao, J., Li, S., Lin, S.-E., Cao, X.-H., He, S., & Weng, X.-C. (2012). Selectivity of N170 in the left hemisphere as an electrophysiological marker for expertise in reading Chinese. *Neuroscience Bulletin*, *28*(5), 577–584.

Zhou, L., Peng, G., Zheng, H.-Y., Su, I.-F., & Wang, W. S.-Y. (2012). Sub-lexical phonological and semantic processing of semantic radicals: a primed naming study. *Reading and Writing, 26*(6), 967–989.

Zhou, X., & Marslen-Wilson, W. (1999). Phonology, orthography, and semantic activation in reading Chinese. *Journal of Memory and Language, 41*(4), 579–606.

Zhou, X. L., Lu, X. M., & Shu, H. (2000). The nature of sublexical processing in reading Chinese: phonological activation of semantic radials. *Acta Psychologica Sinica*. *32*(1), 20–24.[周晓林，鲁学明，舒华. (2000). 亚词汇水平加工的本质:形旁的语音激活. *心理学报*., *32*(1), 20–24.]

N170 adaptation effect of the sub-lexical phonological and semantic processing in Chinese character reading

ZHANG Rui, WANG Zhenhu, WANG Xiaojuan, YANG Jianfeng

(School of Psychology, Shaanxi Normal University, Xi'an, China, 710062)

Abstract

The event-related potential (ERP) studies have revealed a component (N170) near tempo-occipital electrodes was sensitive to visual words. However, its role in word reading is still controversial. A common view is that the N170 engaged in the visual/orthographic processing, whereas some evidence has shown the N170 involved in phonological and semantic processing. By taking advantage of the Chinese writing system's ideographic property, the current study directly examined whether the N170 was sensitive to the phonological and semantic processing in reading Chinese characters.

Two ERP experiments were conducted in a neural adaption paradigm by manipulating the repetition of the sub-lexical phonetic/semantic radical. The ERP data were collected while participants performed a phonological judgment task on the 4th character after silently reading the four characters consecutively. The phonological similarity (Experiment 1) and semantic similarity (Experiment 2) were manipulated among the four characters. Experiment 1 examined the neural adaption of the four characters sharing the phonetic radical (e.g., 敏，侮，悔，莓), the character's pronunciation (e.g., 妹，枚，镁，莓), both of them (e.g., 酶，梅，霉，莓), or neither (e.g., 淮，崛，郎，莓) respectively. Experiment 2 examined the neural adaption of the four characters sharing the semantic radical (e.g., 狡，狂，猜，狒), the character's meaning (e.g., 豹，鹿，羚，狒), both of them (e.g., 狮，狼，狐，狒), or neither (e.g., 淮，崛，郎，狒) respectively.

In both experiments, the results showed a significant neural adaption at N170 in all of the four conditions. The amplitude of the N170 observed in the 1st character decreased in the 2nd – 4th characters. In Experiment 1, the N170 neural adaptation at the left PO7 electrode was sensitive to the repetition of the phonetic radical, and the repetition of the character's pronunciation, but not to the repetition of both. These results indicated the left mid-fusiform gyrus might be sensitive to the visual/orthographic and phonological processing but not to the orthography-to-phonology mapping in Chinese character reading. In Experiment 2, the N170 neural adaption at the left PO7 electrode was only sensitive to the repetition of the character's meaning, which indicated the semantic processing might modulate the left N170 in character reading. The N170 neural adaption at the right PO8 electrode was sensitive to the repetition of the semantic radical and the character's meaning,

which suggested that right N170 was involved in visual/orthographic and semantic processing in reading characters.

In sum, the findings showed that the N170 was involved in the visual/orthographic processing and engaged in the phonological and semantic processing in Chinese character reading. Furthermore, the left N170 was sensitive to the character's phonological and semantic information, whereas the right N170 was sensitive to the character's meaning and its semantic radical.

Key words word reading, N170, Chinese characters, neural adaptation

附表 1. 实验 1 PO7 电极点上 4 个汉字 N170 波幅的配对比较

	O+P+			O+P-			O-P+			O-P-		
	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d
S1 vs. S2	-10.041	0.000	1.58	-8.654	0.000	1.51	-9.251	0.000	1.54	-8.293	0.000	1.46
S1 vs. S3	-9.441	0.000	1.58	-7.71	0.000	1.43	-8.415	0.000	1.26	-8.493	0.000	1.29
S1 vs. S4	-7.302	0.000	1.14	-6.441	0.000	1.01	-6.453	0.000	0.94	-6.168	0.000	0.92
S2 vs. S3	-0.087	1.000	0.01	0.367	1.000	0.03	2.854	0.049	0.26	1.052	1.000	0.09
S2 vs. S4	3.905	0.003	0.33	5.647	0.000	0.48	5.517	0.000	0.50	4.602	0.001	0.48
S3 vs. S4	4.805	0.000	0.34	4.84	0.000	0.43	2.845	0.050	0.25	4.769	0.000	0.38

附表 2. 实验 1 PO8 电极点上 4 个汉字 N170 波幅的配对比较

	O+P+			O+P-			O-P+			O-P-		
	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d
S1 vs. S2	-8.937	0.000	1.87	-8.531	0.000	1.74	-8.123	0.000	1.74	-8.673	0.000	1.86
S1 vs. S3	-8.333	0.000	1.65	-7.126	0.000	1.59	-8.183	0.000	1.47	-8.099	0.000	1.71
S1 vs. S4	-5.808	0.000	1.12	-5.332	0.000	1.00	-6.453	0.000	1.10	-5.766	0.000	1.15
S2 vs. S3	1.419	1.000	0.13	0.932	1.000	0.08	1.741	0.558	0.20	2.379	0.148	0.18
S2 vs. S4	4.808	0.000	0.65	6.67	0.001	0.75	4.528	0.001	0.56	6.783	0.000	0.63
S3 vs. S4	5.084	0.000	0.50	6.619	0.000	0.64	3.815	0.004	0.35	5.617	0.000	0.47

附表 3. 实验 2 PO7 电极点上 4 个汉字 N170 波幅的配对比较。

	O+S+			O+S-			O-S+			O-S-		
	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d
S1 vs. S2	-11.519	0.000	1.90	-10.18	0.000	1.64	-11.41	0.000	1.81	-8.293	0.000	1.46
S1 vs. S3	-9.439	0.000	1.56	-9.145	0.000	1.47	-10.84	0.000	1.61	-8.493	0.000	1.29
S1 vs. S4	-5.977	0.000	0.96	-4.975	0.000	0.87	-7.637	0.000	1.01	-6.168	0.000	0.92
S2 vs. S3	1.182	1.000	0.09	0.055	1.000	0.01	1.284	1.000	0.11	1.052	1.000	0.09
S2 vs. S4	6.401	0.000	0.66	4.484	0.001	0.53	6.513	0.000	0.62	4.602	0.001	0.48
S3 vs. S4	6.482	0.000	0.52	5.261	0.000	0.48	6.122	0.050	0.50	4.769	0.000	0.38

附表 4. 实验 2 PO8 电极点上 4 个汉字 N170 波幅的配对比较

	O+S+			O+S-			O-S+			O-S-		
	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d	t (27)	p	Cohen d
S1 vs. S2	-9.053	0.000	2.13	-9.509	0.000	1.96	-8.475	0.000	2.00	-8.673	0.000	1.86
S1 vs. S3	-8.916	0.000	1.96	-8.837	0.000	1.86	-7.848	0.000	1.87	-8.099	0.000	1.71
S1 vs. S4	-6.377	0.000	1.25	-5.884	0.000	1.10	-5.834	0.000	1.11	-5.766	0.000	1.15
S2 vs. S3	2.847	0.050	0.19	0.445	1.000	0.04	0.63	1.000	0.07	2.379	0.148	0.18
S2 vs. S4	7.721	0.000	0.87	6.236	0.000	0.80	5.977	0.000	0.84	6.783	0.000	0.63
S3 vs. S4	7.389	0.000	0.69	6.318	0.000	0.73	6.285	0.000	0.75	5.617	0.000	0.47